

УДК 621. 382.8.002

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ КОНТРОЛЬ ТОПОГРАФИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН КРЕМНИЯ

С.Ф. СЕНЬКО, А.С. СЕНЬКО, В.А. ЗЕЛЕНИН

*Государственное научное учреждение «Физико-технический институт
Национальной академии наук Беларуси», Республика Беларусь*

Поступила в редакцию 10 января 2018

Аннотация. Проведен расчет светотеневых изображений поверхностей полупроводниковых пластин кремния, полученных методом оптической топографии. Установлена количественная зависимость между интенсивностью светотеневых пятен на топограмме и микрогеометрическими параметрами пластин. Предложено программное обеспечение и критерии количественного 3D-контроля поверхностей пластин.

Ключевые слова: полупроводниковые пластины, оптическая топография, количественный контроль, расчет изображений, программное обеспечение контроля.

Abstract. The calculation of shadow images of the surfaces of semiconductor silicon wafers obtained by Makuh optical topography is carried out. A quantitative relationship between the intensity of the shadow spots on the topogram and the micro geometric parameters of the silicon wafers has been established. The software for quantitative 3D-control and control criteria of the silicon wafer surfaces is proposed.

Keywords: semiconductor wafers, optical topography, quantitative characterization, image calculation, control software.

Doklady BGUIR. 2018, Vol. 115, No. 5, pp. 12-18

Quantitative characterization of topographic defects of semiconductor silicon wafers

S.F. Sianko, A.S. Sianko, V.A. Zelenin

Введение

Повышение степени интеграции и уменьшение размеров элементов современных интегральных схем (ИС) обуславливает необходимость постоянного совершенствования и разработки как новых технологических процессов изготовления, так и новых методов контроля качества поверхности полупроводниковых подложек, среди которых все шире используется метод, получивший название Макуоh или оптической топографии [1–5]. Оптическая схема метода приведена на рис. 1. Он включает освещение контролируемой поверхности AC излучением оптического диапазона от гомоцентрического источника S и наблюдение отраженного на специальный экран светотеневого изображения A^*C^* . Наличие кривизны поверхности, в частности ее элемента AB , приводит к локальному изменению угла отражения света ($\alpha+\beta$) по отношению к углу отражения β поверхностью в целом, что проявляется в изменении интенсивности освещения локальных участков изображения A^*B^* по отношению к среднему значению. Характер распределения интенсивности отраженного света на топограмме позволяет судить о наличии различных топографических дефектов поверхностей контролируемых изделий с разрешением по высоте ~ 6 нм [2, 3].

Нерешенной проблемой в данной области является отсутствие методик расчета изображений контролируемых поверхностей, что не позволяет использовать его для получения количественных параметров их микрогеометрии. Данной проблеме уделяется достаточно много внимания в литературе, но даже в теоретических работах [6] высказывается предположение о невозможности такой оценки вследствие нелинейности зависимости интенсивности светотеневых пятен от размеров дефектов.

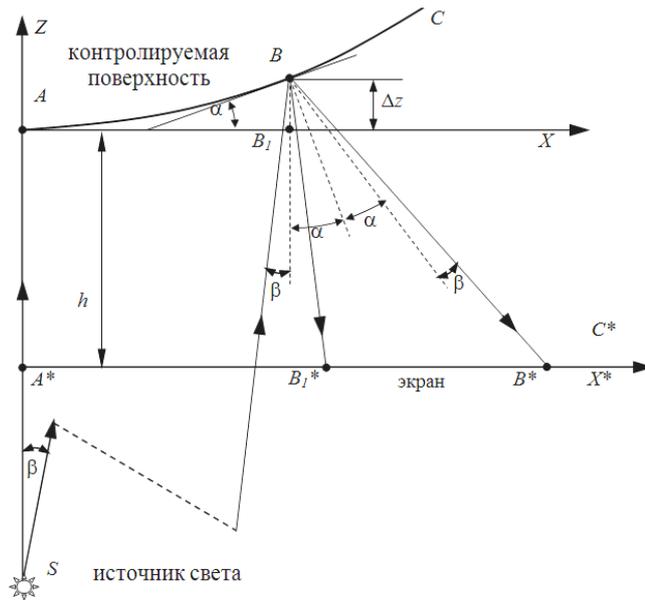


Рис. 1. Оптическая схема контроля поверхностей методом оптической топографии

В настоящей работе установлены зависимости между микрогеометрическими параметрами поверхностей высокого класса обработки и распределением интенсивности светотеневых пятен на топограммах, на основании которых создано программное обеспечение 3D-контроля поверхностей.

Влияние микрогеометрии поверхности на локальную интенсивность ее изображения

В работе [7] авторами решена задача о влиянии отклонения высоты Z локальных участков поверхности, расположенной в координатной плоскости XY , на искажение изображения отдельных кристаллов ИС, сформированных на этой поверхности. Совокупность кристаллов ИС при этом рассматривалась как координатная сетка, искажение изображения которой позволило вычислить величину Z .

Аналогичный подход при решении поставленной задачи используется и в настоящей работе, однако в качестве координатной сетки в данном случае используется совокупность конечных элементов изображения.

Разделим полученное изображение на равные дискретные элементы размерами x и y так, что изменением интенсивности изображения в пределах одного элемента вследствие его достаточно малых размеров можно пренебречь. Соответственно, радиус кривизны локального участка поверхности в пределах одного элемента также принимается постоянным. Затем проведем измерение интенсивностей J_{ij} элементов изображения в выбранном ряду (получение профиля в заданном направлении) или по всей поверхности (построение 3D-изображения). Элемент поверхности $AB = x_{ij}$ формирует на экране элемент изображения $A^*B^* = x$ (см. рис. 1). В случае идеальной поверхности данный элемент занимал бы положение AB_1 и формировал элемент изображения $A^*B_1^*$. Смещение изображения по отношению к идеальному положению составляет $\Delta x = (A^*B^* - A^*B_1^*)$. Смещение $BB_1 = \Delta z$ края выбранного элемента x_{ij} от плоскости XY , обусловленное его кривизной, можно выразить соотношением

$$\Delta z = -\frac{x_{ij}}{2} \operatorname{tg} \alpha, \quad (1)$$

где α – угол между плоскостью XY и касательной к краю элемента x_{ij} .

С другой стороны,

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{\Delta x}{h}, \quad (2)$$

где Δx – смещение реального изображения элемента x_{ij} по отношению к виртуальному изображению, расположенному на идеальной плоскости, h – расстояние от контролируемой поверхности до экрана.

Последовательное вычисление смещения Δx изображения в ряду n элементов позволяет получить значение $\operatorname{tg} \alpha_n$ для n -го элемента:

$$tg\alpha_n|_{j=const} = \frac{\Delta x_n}{2h} = \frac{nx}{2h} - \frac{x}{2h} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{J_{ij}}}{\sqrt{J_0}} = \frac{x}{2h} \left(n - \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{J_{ij}}}{\sqrt{J_0}} \right), \quad (3)$$

где J_0 – среднее значение интенсивности изображения.

Полученное значение $tg\alpha_n$ позволяет вычислить отклонение высоты в направлении оси Z в ряду n элементов, т. е. профиля контролируемой поверхности вдоль координаты X :

$$Z_n|_{j=const} = \frac{x^2}{4khJ_0} \left[\sum_{i=1}^n J_i + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \left(\sqrt{J_i} \sum_{l=i+1}^n \sqrt{J_l} \right) - \sqrt{J_0} \sum_{i=1}^n (2i-1) \sqrt{J_i} \right], \quad (4)$$

где k – общее увеличение изображения, обусловленное ходом лучей.

С учетом того, что изменением координаты X при расчете Z иногда можно пренебречь, а в начальной точке отсчета $\alpha_0 = 0$ и $tg\alpha_0 = 0$, можно записать:

$$Z_i = \frac{x^2}{4kh} \sum \left[(2i-1) - \frac{2 \sum \sqrt{J_i} - \sqrt{J_i}}{\sqrt{J_0}} \right] \quad (5)$$

или

$$Z_i = -\frac{x^2}{4kh} \sum_i \left(\frac{\sqrt{J_{ij}}}{\sqrt{J_0}} - 1 \right). \quad (6)$$

Если выбрать значение x , соизмеримое с наблюдаемыми размерами светотеневых пятен, то Z_i при переходе к последующему элементу обнуляется, т. е. знак суммирования можно опустить. Тогда

$$z_{ij} = C_1 \sqrt{J_{ij}} + \tilde{N}_2, \quad (7)$$

где

$$C_1 = -\frac{x^2}{4kh\sqrt{J_0}}, \quad (8)$$

$$C_2 = \frac{x^2}{4kh}. \quad (9)$$

Таким образом, зависимость геометрического профиля поверхности от интенсивности изображения в данном приближении носит линейный характер. Это чрезвычайно удобно для компьютерной обработки изображений.

Преимуществом параметра z_{ij} является тот факт, что он может быть получен практически прямым измерением в любой точке контролируемой поверхности, так как является непосредственной составляющей матрицы изображения $[J_{ij}]$. При этом значительно повышается скорость обработки полученных результатов, расширяются возможности статистической обработки.

Качество поверхности R_z можно в этом случае определить как среднее арифметическое отклонение параметра z_{ij} от средней плоскости \bar{z} [8, 9].

$$\bar{z} = \frac{1}{N} \sum_{i,j=1}^N z_{ij}, \quad (10)$$

$$R_z = \frac{1}{N} \sum_{i,j=1}^N |z_{ij} - \bar{z}|. \quad (11)$$

Другим важным параметром является среднеквадратичное отклонение σ величины z_{ij}

от средней плоскости \bar{z}

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i,j=1}^N (z_{ij} - \bar{z})^2}{N}} \quad (12)$$

Таким образом, параметры z_{ij} , R_z и σ аналогичны параметрам контроля шероховатости, применяемым в машиностроении, оптике и в др. областях.

Практическая применимость расчетов

Рассмотрим применимость полученных выражений на конкретном примере. На рис. 2 приведена топограмма поверхности полупроводниковой пластины кремния диаметром 100 мм с выделенной областью дефекта (а) размером 20×20 мм и увеличенное изображение этого дефекта, разделенное на элементы (б) с использованием компьютерных технологий [10, 11]. Значения g и h были выбраны равными 1000 мм. Проведем расчет выделенного фрагмента изображения.

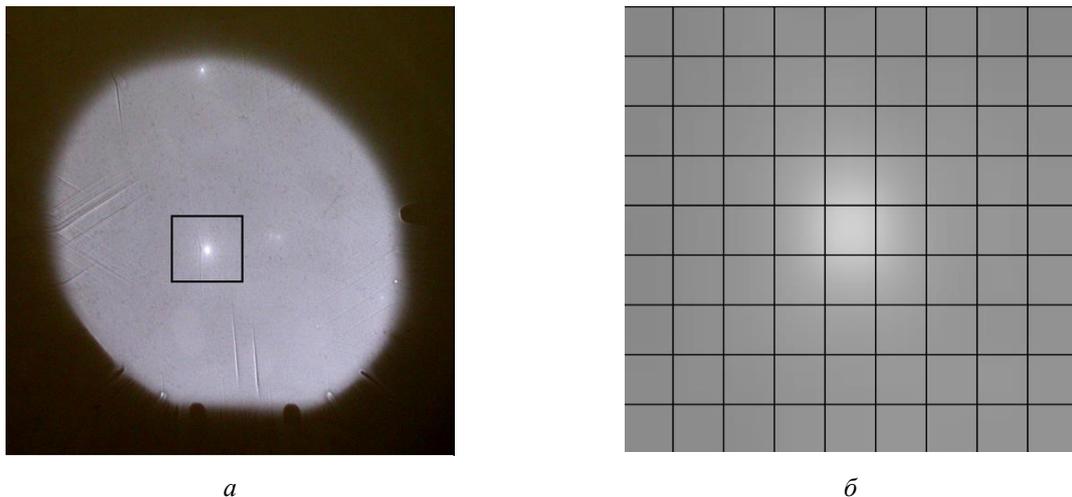


Рис. 2. Топограмма пластины кремния с выделенной областью дефекта (а), и увеличенное изображение дефекта, разделенное на элементы (б)

В табл. 1 приведены результаты измерения интенсивности J_{ij} в относительных единицах для элементов фрагмента изображения, приведенного на рис. 2, б. Как видно из рисунка и таблицы, максимальную интенсивность имеет элемент изображения x_{55} . В табл. 2 приведены результаты расчета координаты Z_{ij} в микрометрах для выделенного фрагмента по формуле (4) при $j = \text{const}$.

Сравнение полученного изображения с данными табл. 1 и 2 показало, что областям повышенной интенсивности соответствует увеличение глубины рассматриваемого дефекта на реальной поверхности.

Очевидно, что количественный контроль всей площади контролируемой поверхности в соответствии с полученными зависимостями без привлечения средств компьютерной диагностики чрезвычайно трудоемок и поэтому малопригоден в серийном производстве. В связи с этим был разработан пакет прикладных программ анализа и расчета изображений, основанный на полученной зависимости (4). Программы предусматривают предварительную обработку изображения, исключаящую разницу в углах падения света в различные точки поверхности, фильтрацию от шумов и преобразование к необходимому размеру и формату изображения. Далее проводится выделение рабочей области пластины и расчет заданных характеристик контролируемой поверхности.

Таблица 1. Относительная интенсивность J_{ij} элементов изображения

Порядковый номер j элемента по оси Y	Порядковый номер i элемента по оси X								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	179	181	184	187	187	186	184	183	181
2	181	183	186	191	190	186	185	184	184
3	181	185	187	197	199	193	190	187	187
4	182	185	191	204	220	202	195	192	190
5	181	187	192	209	239	213	195	192	189

6	180	186	191	205	217	206	192	191	189
7	184	187	190	197	199	198	192	190	189
8	184	187	189	192	192	195	193	191	190
9	184	184	184	190	192	192	190	190	190

Таблица 2. Результаты расчета координаты Z_{ij}

Порядковый номер j элемента по оси Y	Порядковый номер i элемента по оси X								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-0,029	-0,104	-0,194	-0,259	-0,279	-0,261	-0,225	-0,189	-0,174
2	-0,029	-0,104	-0,194	-0,246	-0,234	-0,191	-0,149	-0,120	-0,111
3	-0,054	-0,194	-0,380	-0,540	-0,590	-0,555	-0,497	-0,452	-0,440
4	-0,086	-0,329	-0,675	-1,008	-1,137	-1,063	-0,955	-0,876	-0,856
5	-0,117	-0,437	-0,891	-1,355	-1,521	-1,340	-1,112	-0,965	-0,936
6	-0,096	-0,351	-0,695	-1,017	-1,137	-1,044	-0,906	-0,816	-0,793
7	-0,049	-0,180	-0,354	-0,510	-0,584	-0,572	-0,518	-0,474	-0,460
8	-0,040	-0,143	-0,277	-0,410	-0,521	-0,592	-0,615	-0,617	-0,616
9	-0,028	-0,114	-0,256	-0,420	-0,552	-0,637	-0,689	-0,721	-0,733

На рис. 3 приведено диалоговое окно разработанной программы TopoVision с изображением в левой части окна рабочей области поверхности пластины, выделенной автоматически по краю изображения. Прямой линией на топограмме обозначено выбранное направление контроля профиля, а в центральной части окна – результаты его расчета в выбранном масштабе. В данном конкретном случае глубина ямки в нижней части выбранного направления составила 2,3 мкм.

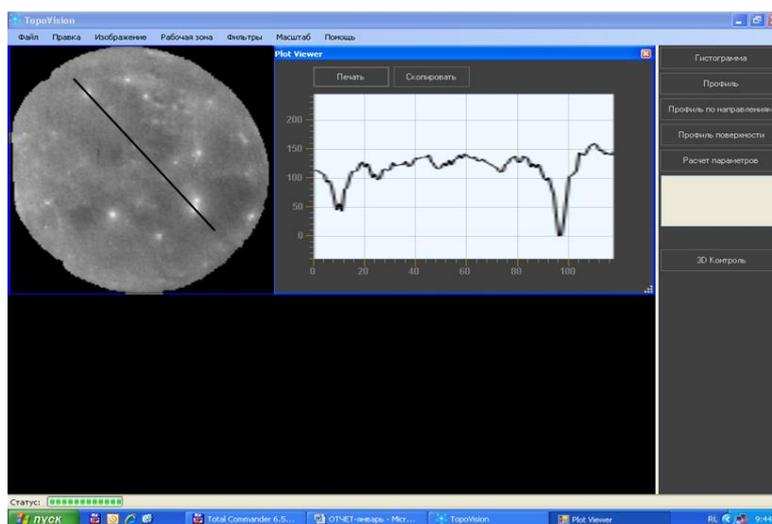


Рис. 3. Топограмма пластины кремния с выделенным направлением контроля и профиль поверхности вдоль выделенного направления

На рис. 4 приведена топограмма кремниевой пластины диаметром 100 мм с дефектами полировки (а) и вариант построения 3D-изображения всей контролируемой поверхности в выбранном масштабе (б). Для облегчения идентификации каждому значению координаты Z присвоен свой оттенок выбранного цвета или палитры. Шкала соответствия приведена рядом с полученным 3D-изображением.

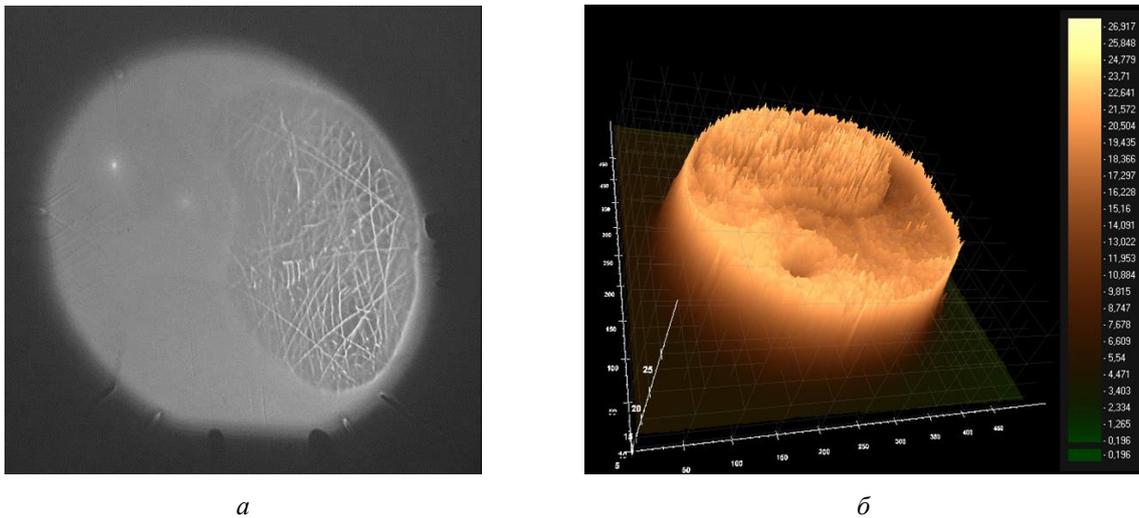


Рис. 4. Топограмма пластины кремния с дефектной поверхностью (а) и ее 3D-изображение в выбранных координатах (б)

Для контроля большого количества изделий в производственных условиях программой предусмотрена разбраковка по статистическим параметрам дефектности в соответствии с выражениями (10)–(12).

Из приведенных данных видно, что поверхность кремниевых пластин не является плоской и содержит большое количество различных геометрических несовершенств, требующих дальнейшего исследования. Размеры несовершенств по координате Z колеблются в значительных пределах и составляют от единиц нанометров до нескольких микрометров (иногда десятков микрометров).

Таким образом, предложенный метод расчета изображений позволяет получать количественные характеристики контролируемой поверхности.

Заключение

Предложен метод расчета светотеневых изображений поверхностей полупроводниковых пластин кремния. Получены выражения, связывающие интенсивность изображения на топограммах и геометрический профиль поверхности, что позволяет осуществлять количественный контроль дефектов с разрешением по высоте от 6 нм. На основе полученных зависимостей разработан комплект прикладных программ анализа изображений, который позволяет получить микрогеометрические параметры контролируемых поверхностей как трехмерных объектов. Полученные результаты могут быть использованы как в исследовательских целях, так и в условиях серийного производства для оперативной разбраковки полупроводниковых подложек.

Список литературы

1. Pei Z.J. A study of surface grinding of 300 mm silicon wafers // Int. J. of Mashine Tools & Manufacture. 2002. Vol. 42 (3) P. 385–393.
2. Makyoh-topography study of the swirl defects in Si wafers / R. Ferenc [et al.] // Thin Solid Films. 2008. Vol. 516, iss. 22. P. 8087–8091.
3. Characterization of mirror-like wafer surfaces using magic mirror method / S. Hahn [et al.] // J. of Crystal Growth. 1990. Vol. 103, № 1–4. P. 423–432.
4. Kugimiya K. «МАКЮОН»: The 2000 year old technology still alive // J. of Crystal Growth. 1990. Vol. 103, № 1–4. P. 420–422.
5. Riesz F. Makyoh Topography for the Study of Large-Area Extended Defects in Semiconductors // Phys. Stat. Sol. (a). 1999. Vol. 171, № 1. P. 403–409.
6. Riesz F. Geometrical optical model of the image formation in Makyoh (magic-mirror) topography // J. Phys. D: Appl. Phys. 2000. № 33. P. 3033–3040.
7. Сенько С.Ф., Зеленин В.А. Оценка размеров топографических дефектов полупроводниковых кремниевых структур. Приборы и методы измерений. 2018. Т. 9, № 1. С. 74–84.
8. Топорец А.С. Оптика шероховатой поверхности. Л.: Машиностроение. 1988. 191 с.
9. ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения.
10. Сенько А.С., Сенько С.Ф., Зеленин В.А. Количественный контроль микрогеометрии поверхности полупроводниковых пластин // Материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. «Высокие технологии в

- промышленности России», Москва, 29–30 июня 2001 г. С. 269–271.
11. Прэрт У. Цифровая обработка изображений. М.: Мир. 1982. 708 с.

References

1. Pei Z.J. A study of surface grinding of 300 mm silicon wafers // *Int. J. of Mashine Tools & Manufacture*. 2002. Vol. 42 (3) P. 385–393.
2. Makyoh-topography study of the swirl defects in Si wafers / R. Ferenc [et al.] // *Thin Solid Films*. 2008. Vol. 516, iss. 22. P. 8087–8091.
3. Characterization of mirror-like wafer surfaces using magic mirror method / S. Hahn [et al.] // *J. of Crystal Growth*. 1990. Vol. 103, № 1–4. P. 423–432.
4. Kugimiya K. «МАКҮОН»: The 2000 year old technology still alive // *J. of Crystal Growth*. 1990. Vol. 103, № 1–4. P. 420–422.
5. Riesz F. Makyoh Topography for the Study of Large-Area Extended Defects in Semiconductors // *Phys. Stat. Sol. (a)*. 1999. Vol. 171, № 1. P. 403–409.
6. Riesz F. Geometrical optical model of the image formation in Makyoh (magic-mirror) topography // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2000. № 33. P. 3033–3040.
7. Sen'ko S.F., Zelenin V.A. Ocenka razmerov topograficheskikh defektov poluprovodnikovyyh kremnievyyh struktur. *Pribory i metody izmerenij*. 2018. T. 9, № 1. S. 74–84. (in Russ.)
8. Топорас А.С. Оптика шероховатой поверхности. Л.: Mashinostroenie. 1988. 191 s. (in Russ.)
9. GOST 2789–73. Sherohovatost' poverhnosti. Parametry, harakteristiki i oboznachenija. (in Russ.)
10. Sen'ko A.S., Sen'ko S.F., Zelenin V.A. Kolichestvennyj kontrol' mikrogeometrii poverhnosti poluprovodnikovyyh plastin // *Materialy VII Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Vysokie tehnologii v promyshlennosti Rossii»*, Moskva, 29–30 iyunja 2001 g. S. 269–271. (in Russ.)
11. Prjett U. Cifrovaja obrabotka izobrazhenij. M.: Mir. 1982. 708 s. (in Russ.)

Сведения об авторах

Сенько С.Ф., ведущий инженер Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси».

Сенько А.С., инженер Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси».

Зеленин В.А., д.т.н., профессор, заведующий сектором Государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси».

Адрес для корреспонденции

220114, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Купревича, 10,
Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси»
тел. +375-17-267-55-22;
e-mail: senkosf@tut.by
Сенько Сергей Федорович

Information about the authors

Sianko S.F., lieder engineer of State scientific institution «Physical technical institute of the National academy of sciences of Belarus».

Sianko A.S., engineer of State scientific institution «Physical technical institute of the National academy of sciences of Belarus».

Zelenin V.A., D.Sci, professor, head of sector of State scientific institution «Physical technical institute of the National academy of sciences of Belarus».

Address for correspondence

220114, Republic of Belarus,
Minsk, Kuprevich st., 10,
State scientific institution «Physical Technical Institute of the National Academy of sciences of Belarus»
tel. +375-17-267-55-22;
e-mail: senkosf@tut.by
Sianko Siarhei Fyodaravich